

新型阻力环钢筋灌浆套筒连接力学性能研究

孟凌霄¹,付涛^{2*},孙中华³,许英东¹,路鹏²

(1.中国建设基础设施有限公司,北京市 100044;2.山东建筑大学 交通工程学院,山东 济南 250101;

3.中建八局第一建设有限公司,山东 济南 205102)

摘要:装配式桥梁施工技术具有保护环境、降低噪声、提高施工质量和提高施工效率等优点,装配式构件中主要受力钢筋能否可靠连接是保证该预制结构具有良好性能的关键。灌浆套筒连接是装配式结构中钢筋连接的重要方式之一,该文提出新型阻力环灌浆套筒的构造,通过有限元数值模拟分析该钢筋灌浆套筒连接在单向拉伸和往复拉压工况下的工作性能。结果表明:新型阻力环灌浆套筒在单向拉伸工况下各个部件的力学性能符合规范要求;在高应力往复拉压20个循环后总残余变形为0.24 mm,属于Ⅰ级接头,随着循环加载的继续进行,在第10次循环后灌浆料的耗能刚度降低,灌浆料形成相对稳定可靠的传递荷载的路径,此时灌浆料在拉伸与压缩状态下的第三主应力最大值趋于稳定,灌浆料与钢筋、套筒形成良好的传力组合,钢筋套筒构件整体性能良好。

关键词:装配式结构;灌浆套筒;数值模拟;力学性能

中图分类号:U443.15+4

文献标志码:A

0 引言

随着中国经济的快速发展,中国桥梁建设的进程亦在不断加速,据不完全统计^[1],中国共有公路桥梁90余万座,其中大多数仍采用传统的建造方法,尤其是下部结构还是以现浇混凝土施工为主体,这些传统的施工方法虽然较为成熟,工艺相对简单,但也存在诸多缺点^[2],如:施工生产效率低、施工工期长、需要大量人工、危险性高、现场污染严重、文明施工差、质量控制存在难度、对周围环境和道路交通影响大等各种问题^[3]。如何在保证工程施工质量及成本预算的前提下,尽可能地利用有限的施工场地,有限的人工,更快更好地进行工程建设,并且尽量减小对周围环境和道路交通的影响,成为世界各国桥梁专家学者的研究热点问题之一。

经过几十年的发展与应用,关于桥梁上部结构装配式研究相对成熟,基本实现工业化生产,但是对于桥梁下部结构装配式研究发展较慢。灌浆套筒的

作用是在装配式结构中连接钢筋,在预制结构钢筋的连接中举足轻重;灌浆套筒根据结构特点可以分为全灌浆套筒及半灌浆套筒^[4]。全灌浆套筒两端钢筋与套筒相连均通过内部配套的灌浆料;半灌浆套筒是一端与钢筋相连,另一端采用螺纹等其他方式连接,借助螺纹与钢筋之间的咬合作用力来分担轴向应力。

目前市面上主要的灌浆套筒产品有东南大学郑永峰博士课题组研发的一种新型灌浆套筒(GDPS灌浆套筒)^[5],针对目前最常用的直径为25 mm、HRB400的钢筋,套筒的制作通过冷加工工艺滚压处理无缝钢管,便于大规模加工生产;JM灌浆套筒^[6]由北京一家设备公司研发制造,该套筒适用于中小直径的HRB400级钢筋,并成功应用于北京万科假日风景项目工程中;此后,北京建茂公司又立项研发JM后续系列的大直径灌浆套筒以及与之配套使用的灌浆料;OVM灌浆套筒^[7]由欧维姆公司研发,可以适用于预制桥梁结构中钢筋连接。

本文在总结现有灌浆套筒的基础上,提出一种

收稿日期:2022-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51408339);中建基础科技研发项目(编号:CSCIC-2020-KT-05);山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2021ME227);山东省研究生教育质量提升计划项目(编号:SDYAL19110)

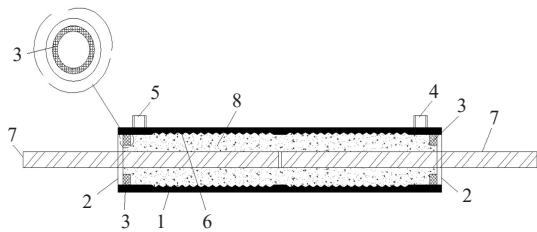
作者简介:孟凌霄,男,硕士,工程师.E-mail:muluo690119@163.com

*通信作者:付涛,男,博士,副教授.E-mail:greenvillage_17@163.com

新型阻力环灌浆套筒,通过对新型阻力环灌浆套筒连接节点的研究,深入探索新型阻力环灌浆套筒连接节点的工作机理,揭示其力学性能,为新型钢筋灌浆套筒的设计、制作、优化、应用提供理论支持与技术支撑,以期更好地在中国推动装配式桥梁结构的发展,并将其应用于实际工程之中。

1 新型阻力环灌浆套筒构造

在总结现有灌浆套筒的基础上,提出一种新型阻力环灌浆套筒,新型阻力环灌浆套筒采用 Q390B 无缝钢管加工制作,套筒两端设置阻力环,以点焊的方式连接固定,套筒内部为车丝螺纹,车丝深度为 2 mm,采用高强灌浆料,可有效增强灌浆料与钢筋之间的黏结作用力。新型阻力环灌浆套筒如图 1 所示。



注:1-套筒;2-密封塞;3-阻力环;4-注浆口;5-出浆口;
6-车丝螺纹;7-连接钢筋;8-灌浆料。

图 1 新型阻力环灌浆套筒构造图

新型阻力环灌浆套筒的结构形式为全灌浆套筒,与现有的套筒相比,有以下特点:① 新型阻力环灌浆套筒内壁布置车丝螺纹,车丝螺纹通过专用数控机床一次加工而成,可以大幅度提高套筒与内部灌浆料的相互作用力;② 在套筒两端各设有一个阻力环,阻力环与套筒通过点焊焊接为一个整体,在增强套筒与内部灌浆料咬合作用的同时还能有效地减少产生套筒-灌浆料滑移破坏的情况;③ 采用高强灌浆料,具有早强、高强、高延性的优良性能。

2 新型钢筋灌浆套筒在单向拉伸荷载作用下的力学性能分析

2.1 钢筋接头的分类及钢筋灌浆套筒的破坏形式

根据《钢筋机械连接通用技术规程》^[8](JGJ 107—2016)对各个等级的钢筋机械连接接头的性能要求的规定,钢筋灌浆套筒连接接头的性能应该包括单向拉

伸、高应力往复拉压、大变形往复拉压和疲劳性能;其中钢筋灌浆套筒连接构件接头根据其极限抗拉强度、往复加载后的残余变形、最大力下总伸长率以及大变形条件下往复压力性能可以分为三级^[9-10]。

钢筋灌浆套筒连接节点在单向拉伸工况下的破坏形态一般分为 3 种^[11]:钢筋拉断破坏、套筒破坏以及钢筋-灌浆料黏结滑移破坏;钢筋与灌浆料之间的相互作用力由三类作用力组成^[12-13]:灌浆料在钢筋的外表面形成化学黏结力、灌浆料对钢筋的摩擦作用以及钢筋外表面的螺纹与灌浆料之间产生的机械咬合力。

当钢筋受力过大,会导致钢筋产生大变形,此时化学黏结力消失,钢筋与灌浆料之间的作用力由摩擦力及机械咬合力提供;当钢筋受拉力作用时,钢筋的径向应力会使灌浆料同样受到拉力,致使灌浆料微膨胀,又由于套筒的约束作用使得钢筋与灌浆料之间的相互作用力进一步变强^[14]。故钢筋灌浆套筒在单向拉伸工况下的破坏模式主要取决于钢筋的极限拉压强度和钢筋与灌浆料黏结作用力的大小:当钢筋的极限拉压强度大于钢筋与灌浆料黏结作用力时,钢筋灌浆套筒连接构件发生钢筋拉断破坏;当钢筋的极限拉压强度小于钢筋与灌浆料黏结作用力时,构件发生钢筋黏结滑移破坏。

2.2 灌浆套筒钢筋连接有限元模型的建立

灌浆套筒连接接头有限元模型参数如表 1~3 所示。

表 1 套筒参数

套筒壁厚	套筒长度	套筒外径	阻力环高
6	330	60	5

表 2 灌浆料参数

竖向膨胀率/ %	弹性模量/ MPa	泊松比	灌浆料密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
0.005	34 500	0.2	2 200

表 3 钢筋参数

钢筋直径/ mm	锚固长度/ mm	钢筋密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服强度/ MPa	极限抗拉强度/ MPa
32	160	7 800	400	570

本文所建立的有限元数值模型中高强灌浆料本构关系如图 2 所示。

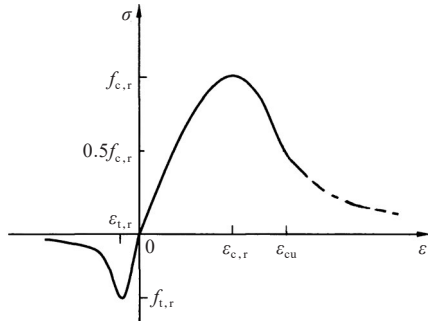


图2 高强灌浆料应力-应变曲线图

混凝土单轴受压的应力-应变曲线可按下列公式确定:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \epsilon \quad (1)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r}} \quad (3)$$

$$n = \frac{E_c \epsilon_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (4)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c,r}} \quad (5)$$

式中: α_c 为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数值; $f_{c,r}$ 为混凝土单轴抗压强度代表值, 其值可以根据实际结构分析的需要分别取 f_c 、 f_{ck} 或 f_{cm} ; $\epsilon_{c,r}$ 为与单轴抗压强度相应的混凝土峰值压应变; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化系数。

混凝土单轴受拉的应力-应变曲线可按下列公式确定:

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \epsilon \quad (6)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2x^5) & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_c (x - 1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \epsilon_{t,r}} \quad (8)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{t,r}} \quad (9)$$

式中: α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数值; $f_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度代表值, 其值可以根据实际结构分析的需要分别取 f_t 、 f_{tk} 或 f_{tm} ; $\epsilon_{t,r}$ 为与单轴抗拉强度 $f_{c,r}$ 相应的混凝土峰值拉应变; d_t 为混凝土

土单轴受拉损伤演化系数。

模型的钢筋选用直径为 32 mm 的 HRB400 钢筋, 在模拟过程中给钢筋加载时, 钢筋只受轴向拉力, 钢筋的弹塑性本构关系如图 3 所示; 套筒的应力-应变关系如图 4 所示。

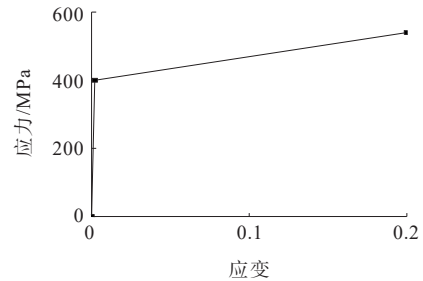


图3 钢筋应力-应变曲线图

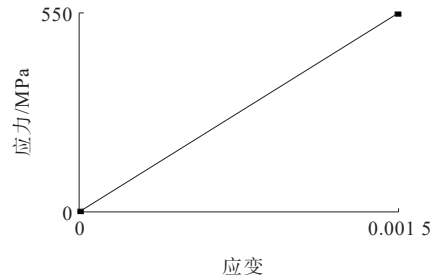


图4 套筒应力-应变曲线图

2.3 数值分析结果

2.3.1 荷载-位移曲线

图 5 为钢筋灌浆套筒数值模型的荷载-位移曲线。

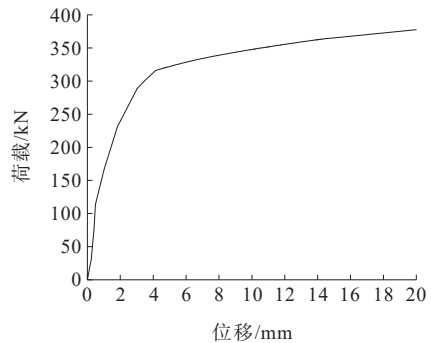


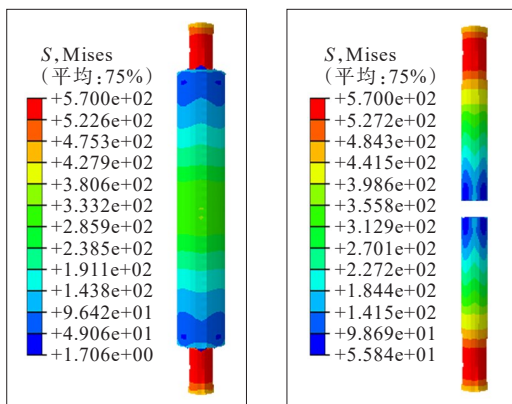
图5 荷载-位移曲线

由图 5 可知: 在曲线上升段部分, 构件的整体刚度相对较大, 荷载和位移近似为线性变化关系, 此时构件仍处于弹性阶段; 随着位移的不断增大, 曲线进入水平段, 在此阶段钢筋发生屈服; 构件发生钢筋拉断破坏, 在单向拉伸荷载作用下, 套筒的极限承载力为 383 kN。

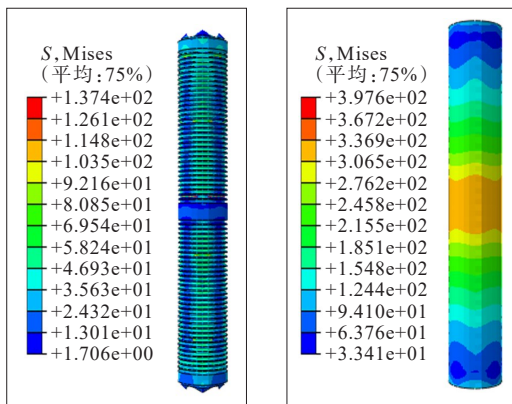
2.3.2 钢筋接头各部件应力变化规律分析

钢筋灌浆套筒连接接头、钢筋、灌浆料、套筒的

Mises 应力云图如图 6 所示。



(a) 灌浆套筒 Mises 应力云图 (b) 钢筋 Mises 应力云图



(c) 灌浆料 Mises 应力云图 (d) 套筒 Mises 应力云图

图 6 灌浆套筒各部分 Mises 应力云图(单位:MPa)

(1) 由图 6(a)可以得出:钢筋在两加载端处 Mises 应力达到最大,锚固钢筋被拉长,钢筋加载端部的最大 Mises 应力值为 570 MPa,达到钢筋的极限抗拉强度,此时钢筋所受内力通过灌浆料传递给外套筒,在套筒阻力环处达到 Mises 应力最大值,钢筋接头发生钢筋拉断破坏,钢筋拉断破坏时接头构件的实测极限抗拉强度大于等于钢筋极限抗拉强度标准值,并且符合 I 级接头的要求。

(2) 图 6(b)为该构件在单向拉伸工况下钢筋的 Mises 应力云图,由图可知:钢筋的应力分布由钢筋的非加载端部沿轴向向钢筋的加载端逐渐变大,Mises 应力达到最大约为 570 MPa,达到钢筋的极限抗拉强度;在非加载端部,钢筋的边界条件为自由,此时该端部的 Mises 应力为最小值,约为 50 MPa;加载端与非加载端的 Mises 应力符合其相对应的边界条件。

(3) 图 6(c)为灌浆料的 Mises 应力云图,灌浆料处于套筒与钢筋之间,灌浆料在该工况下 Mises 应力值较小,在 18~100 MPa 之间浮动;由图 6(c)可以清

晰地看出:灌浆料与套筒车丝螺纹相接触部位的 Mises 应力分布较为均匀,并于灌浆料中下部形成了传力带,被用来传递钢筋与套筒之间的力;在套筒内壁所设置的车丝螺纹处于较为复杂的受力状态。

(4) 图 6(d)为套筒的 Mises 应力云图,套筒的端部阻力环的位置 Mises 应力达到最大值,约为 397 MPa,在阻力环处 Mises 应力大小在 210~397 MPa 之间浮动,并沿着套筒轴向由阻力环端至底部呈先减小后增大的趋势,在套筒中部应力值达到 300 MPa,阻力环在钢筋受到轴向拉力的工况下对其的约束作用较为明显,并且套筒的 Mises 应力最大值 397 MPa 未达到套筒材料的屈服强度 550 MPa,说明套筒此时还有较大的安全使用空间。

2.3.3 灌浆料第三主应力分析

新型钢筋灌浆套筒连接构件中灌浆料的第三主应力云图如图 7 所示。

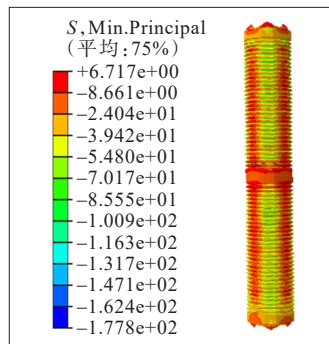


图 7 灌浆料第三主应力云图(单位:MPa)

由图 7 可知:在对钢筋灌浆套筒施加单向拉伸荷载工况下,该构件灌浆料部件的第三主应力大多为压应力,压应力最大出现在灌浆料顶部,其数值为 178 MPa,造成这个现象的原因为钢筋加载端受拉,从而导致带动灌浆料有受拉的趋势;灌浆料仅在与套筒中部和车丝螺纹相接触的部位第三主应力为拉应力,数值约为 6 MPa。

3 新型钢筋灌浆套筒在往复荷载作用下的力学性能分析

3.1 钢筋接头的性能要求及设计原则

结合钢筋灌浆套筒在装配式结构中的广泛使用,按照现行规范中对钢筋灌浆套筒力学性能的相关要求,通过 Abaqus 有限元分析软件,对本文所提出的新型钢筋灌浆套筒构件进行有限元模拟,考虑其

在往复荷载工况作用下的情况,高应力往复拉压工况是为了模拟套筒整体构件在频发地震作用下钢筋部件未发生塑性变形时往复拉压的力学性能^[15-16]。

3.1.1 钢筋接头的性能要求

根据《钢筋机械连接通用技术规程》(JGJ 107—2016)对于各个等级的钢筋机械连接接头的性能要求的规定,3种等级的钢筋连接接头在高应力往复拉压下的各项性能要求如表4所示^[17]。

表4 高应力往复拉压工况下的变形性能

高应力往复拉压	残余变形 U_{20}/mm
I 级	≤ 0.3
II 级	≤ 0.3
III 级	≤ 0.3

注: U_x 为钢筋接头构件按规范加载制度经过高应力往复拉压 x 次后的残余变形。

3.1.2 钢筋接头的加载制度

基于有限元分析软件 Abaqus,对高应力往复拉压工况进行了数值模拟,探究新型阻力环灌浆套筒在上述工况下的应力应变分布规律,同时在此基础上对钢筋、套筒、灌浆料之间的荷载传递机理做出详细的阐述。加载方式如表5所示。

表5 高应力往复拉压工况加载方式

工况	加载方式
高应力往复拉压	$0 \rightarrow (0.9f_{yk} \rightarrow -0.9f_{yk}) \rightarrow \text{破坏}$ (往复20次)

注: f_{yk} 为钢筋屈服强度标准值。

3.2 数值分析结果

3.2.1 钢筋套筒连接节点荷载-变形曲线

对该钢筋连接构件在高应力往复拉压工况下进行数值模拟,分析新型阻力环灌浆套筒在此工况下的力学性能,在往复加载20次后得到钢筋套筒连接节点的荷载-变形图如图8所示。

由图8可以得出:新型阻力环灌浆套筒在高应力往复拉压工况下往复加载20次后的残余变形为0.12 mm,故整个构件在Y方向上的总残余变形为0.24 mm,即 U_{20} 小于0.3 mm,表明钢筋在此工况下只发生了弹性变形,该接头属于I级接头,具有高延性并能往复拉压,可以适用于混凝土结构中发挥钢筋强度和对钢筋的延性要求较高的情况。并且在每次循环加载过后,该连接节点的力-变形曲线为线性变化且

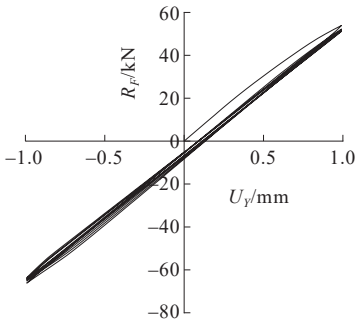


图8 往复加载20次后荷载-变形曲线

最高值接近,表明了该构件在高应力往复拉压工况下循环20次加载中变形能力变化幅度不大。

3.2.2 往复荷载作用下钢筋和套筒应力分析

提取新型阻力环灌浆套筒在高应力往复拉压工况下往复加载20次后钢筋和套筒部件的最大应力值部位的数据,钢筋最不利位置出现在钢筋加载端,套筒的最不利位置出现在套筒中部位置,故选取钢筋加载端和套筒中部作为最有代表的点加以分析,结果如图9、10所示。

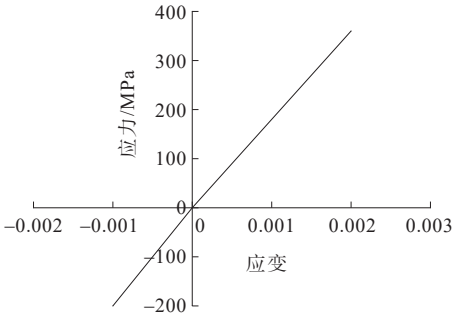


图9 往复荷载作用下钢筋最不利位置应力-应变图

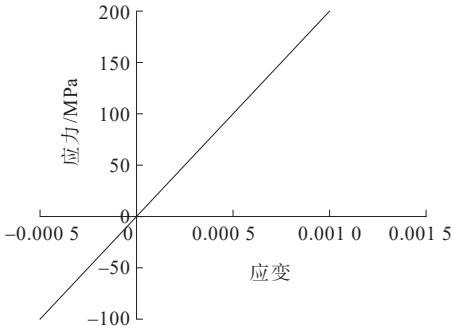


图10 往复荷载作用下套筒最不利位置应力-应变图

由图9、10可以得出:在对钢筋施加循环荷载后,钢筋的最不利位置处的最大应力值为360 MPa,套筒中部的最大应力值为214 MPa,钢筋和套筒均未发生塑性变形,仍然在弹性阶段,说明新型阻力环灌浆套筒在高应力往复拉压工况下往复加载20次后仍处于

安全使用的状态,此时套筒部件的最大应力值小于其极限抗拉强度,说明套筒在经过往复拉压荷载后性能满足要求。

3.2.3 往复荷载作用下灌浆料力学性能分析

灌浆料在往复加载循环中其应力状态复杂多

变,随着不断地施加荷载,灌浆料的应力也在不断变化,为了更好地探究灌浆料在往复荷载工况下的应力变化规律,提取加载至 0.9 倍钢筋屈服强度标准值时,第 1 次、第 10 次、第 20 次的灌浆料第三主应力云图如图 11 所示。

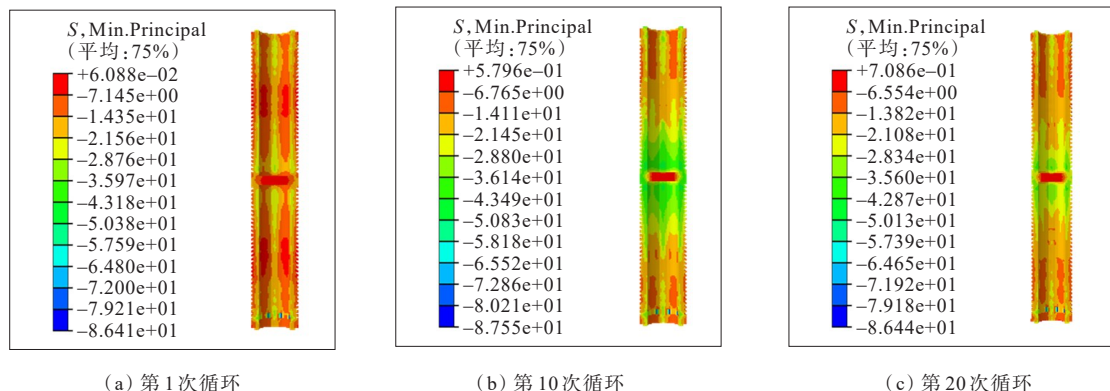


图 11 灌浆料第三主应力云图(单位:MPa)

由图 11 可以看出:在第 1 次加载至 0.9 倍的钢筋屈服强度标准值后,灌浆料仅有个别点的第三主应力最大值达到 93 MPa,为压应力,灌浆料外表面的大部分区域第三主应力值约为 13 MPa,内表面的应力值在 20~30 MPa 之间浮动,分析数据可以得知:在第 1 次拉伸至 0.9 倍的钢筋屈服强度标准值时,灌浆料承担传递钢筋与套筒之间荷载的作用,故从图中可以明显地看出此时灌浆料还未形成明显的传力带。

对比图 11(b)、(c),在往复加载至第 10 次、第 20 次后,灌浆料的第三主应力最大值稳定在 95 MPa 左右,此时灌浆料外表面其余部位的第三主应力值在 30~50 MPa 之间,分析可知在循环加载至第 10 次时,灌浆料内表面第三主应力值已经与初次加载时不同,形成了相对明显的不同应力值区域,此时灌浆料的整体性能趋于稳定,并未发生塑性变形。分析数据可知在循环施加荷载之后,灌浆料形成了相对明显的传力带,灌浆料处于套筒与钢筋之间,是传递两者之间荷载的媒介,灌浆料通过机械咬合力、摩擦力和各个界面之间的黏结作用力来传递外荷载,当构件中的钢筋受到轴向拉力时,外荷载通过钢筋的加载端传递至灌浆料,灌浆料承受钢筋的纵向剪切应力和径向压力,因为有套筒的约束作用,故灌浆料不会因为纵向剪切应力而导致强度丧失,此时灌浆料受力整体性能良好,未发生塑性变形。

为了进一步探究灌浆料在往复荷载作用下的力

学性能规律,提取灌浆料分别在拉伸和压缩至最大应力值,得到灌浆料在拉伸和压缩下最大应力值变化曲线如图 12、13 所示。

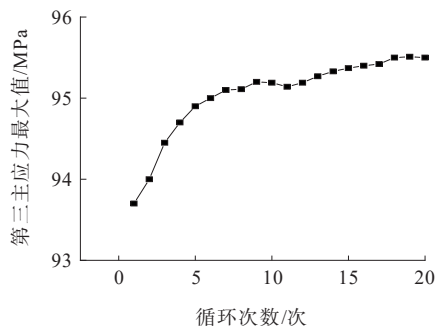


图 12 拉伸状态下灌浆料第三主应力最大值变化曲线

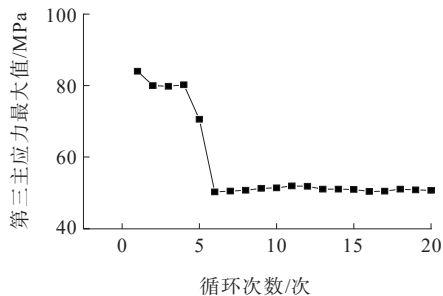


图 13 压缩状态下灌浆料第三主应力最大值变化曲线

由图 11(a)可以看出:灌浆料在第 1 次循环加载时整体受力较为均匀,主要靠灌浆料与套筒车丝螺纹之间的机械咬合力承担外部荷载;由图 12 可知:拉伸状态下,在第 1 次循环至第 10 次循环中,灌浆料的第三主应力最大值逐步提升,此时灌浆料的受力情

况较为复杂;在第10次循环加载后,灌浆料内外表面形成了相对稳定的传力带,每次循环加载后的灌浆料的第三主应力最大值也随之稳定,达到95 MPa左右,出现在灌浆料中间部位,表明这种情况下新型阻力环灌浆套筒整体力学性能良好,可以在地震作用下安全使用;由图13可知:同拉伸情况相似,在对新型阻力环灌浆套筒往复压缩20次后,在前5次循环加载中,灌浆料的第三主应力最大值相对后面循环加载较大,并且有逐步递减的趋势,在第6次循环压缩加载后灌浆料第三主应力值稳定在50 MPa左右。

造成以上两种现象的原因是灌浆料受到钢筋斜向拉力,在灌浆料与套筒之间有黏结作用力和与车丝螺纹之间的机械咬合力作用下,灌浆料将斜向应力的环向分应力传递给套筒,此时套筒会产生环向膨胀,这种情况下钢筋的应力会从加载端至自由端逐渐减小,灌浆料也由于套筒的约束作用不易发生大变形,并且在套筒产生环向应变后,灌浆料形成稳定可靠的传递荷载的路径,3个部件协同抵抗外部荷载,新型阻力环灌浆套筒施加往复荷载20次后,其残余变形也趋于稳定。

4 结论

(1) 在模拟单向拉伸工况下,新型阻力环灌浆套筒中钢筋部件加载端所受的应力为570 MPa时,达到钢筋的极限抗拉强度,钢筋发生拉断破坏,符合规范中Ⅰ级接头的要求。

(2) 钢筋的应力由加载端至非加载端有逐步减小的趋势,在钢筋发生拉断破坏时,套筒部件所受最大应力发生在套筒顶端阻力环处以及套筒中部,并没有达到套筒的极限抗拉强度,套筒所受应力的趋势为由阻力环处向套筒底端先变小后增大;灌浆料的应力值分布较为均匀,灌浆料处于套筒与钢筋之间,其最大应力值出现在与套筒内腔车丝螺纹接触的部位,灌浆料受到的应力多为压应力。

(3) 在模拟高应力往复拉压工况下,新型阻力环灌浆套筒总残余变形为0.24 mm,属于Ⅰ级接头范畴,在此工况下该钢筋接头的钢筋与套筒部件皆没有发生塑性变形,往复拉压20次后仍在弹性使用阶段;随着加载次数的增加,灌浆料形成了稳定可靠的传力带,并且灌浆料的第三主应力最大值也趋于稳

定,与钢筋、套筒之间形成受力良好的传力组合,新型阻力环灌浆套筒整体力学性能良好。

参考文献:

- [1] 徐雨濛.我国装配式建筑的可持续性发展研究[D].武汉:武汉工程大学,2015.
- [2] 梁桂保,张友志.浅谈我国装配式住宅的发展进程[J].重庆工学院学报,2006,20(9):50-52,60.
- [3] 于龙飞,张家春.装配式建筑发展研究[J].低温建筑技术,2015,37(9):40-42.
- [4] 王东辉,柳旭东,陈勇.装配整体式混凝土结构的发展[J].混凝土,2012(1):113-115.
- [5] 郑永峰.GDPS灌浆套筒钢筋连接技术研究[D].南京:东南大学,2016.
- [6] 樊骅,张中育.国内外混凝土预制件发展现状分析[J].混凝土世界,2013(2):70-75.
- [7] 李富.不同构造装配式桥墩的力学性能比较性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [8] 中国建筑科学研究院,荣盛建设工程有限公司.钢筋机械连接技术规程:JGJ 107—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [9] HABER Z B, MACKIE K R, AL-JELAWY H M. Testing and analysis of precast columns with grouted sleeve connections and shifted plastic hinging[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(10): 04017078.
- [10] AMELI M J, PANTELIDES C P. Seismic analysis of precast concrete bridge columns connected with grouted splice sleeve connectors[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(2): 04016176.
- [11] XU L, PAN J L, CAI J M. Seismic performance of precast RC and RC/ECC composite columns with grouted sleeve connections[J]. Engineering Structures, 2019, 188: 104-110.
- [12] LING J H, ABD RAHMAN A B, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 90-98.
- [13] ZHAO X L, GHOJEL J, GRUNDY P, et al. Behaviour of grouted sleeve connections at elevated temperatures[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(7): 751-758.
- [14] 张言,刘泽帆,叶峰.新型FRP灌浆套筒预制拼装技术研究[J].四川建筑,2015,35(6):176-179.
- [15] 张哲,邵旭东,李文光,等.超高性能混凝土轴拉性能试验[J].中国公路学报,2015,28(8):50-58.
- [16] 李玉博.基于高性能灌浆料研制的新型套筒设计与连接性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [17] 聂建国,王宇航.ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J].工程力学,2013,30(4):59-67,82.